

## НАПРАВЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЕТРА И ОРИЕНТАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В F-ОБЛАСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Н.Ю. Романова (Полярный геофизический институт, Мурманск, e-mail: romanova@pgi.ru)

**Аннотация.** Исследуются мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F-области среднеширотной ионосферы. Ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  неоднородностей сопоставлена с направлением HWM07 горизонтального ветра для каждого случая. Показано, что неоднородности в перпендикулярной к магнитному полю плоскости вытягиваются вдоль направления горизонтального ветра.

### Введение

Известно, что мелкомасштабные неоднородности электронной плотности (от нескольких сотен метров до первых километров) в F-области ионосферы вытянуты вдоль геомагнитного поля. В работе [1] дана их классификация по соотношению осей. Приведены типы неоднородностей: стержни (rods, соотношение осей a:1:1), крылья (winds, a:b:1, a>b) и листы (sheets, a:a:1). Предполагается, что наблюдение стержней более вероятно в высоких широтах, а наблюдение крыльев и листов – в средних широтах. С использованием метода спутникового радиозондирования и математической обработки радиосигнала [2], в работе [3] описаны случаи наблюдения в среднеширотной ионосфере поперечно-анизотропных неоднородностей. Их параметры схожи с параметрами высокоширотных неоднородностей [4]: они вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля (ось  $\alpha$ ) и в некотором направлении перпендикулярно ему (ось  $\beta$ ), т.е. поперечно-анизотропны. При различных геофизических условиях поперечная анизотропия, так же как и в высоких широтах, имеет различную ориентацию (угол  $\Psi_A$ ) относительно направления на север. Это сходство позволило предположить существование в средних широтах некоторого механизма, управляющего ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$ , аналогичного дрейфу плазмы  $E \times B$  для высокоширотных неоднородностей. Но электрические поля в средних широтах в спокойных условиях малы (1-5 мВ/м), соответственно, незначителен и электромагнитный дрейф, в то время как величина горизонтального нейтрального ветра в ночное время может достигать 200 м/с [5]. Поэтому цель данной работы – сопоставить полученные в работе [3] экспериментальные данные об ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  с теоретическими расчетами направления горизонтального ветра, выполненными на основе модели HWM07 [6, 7].

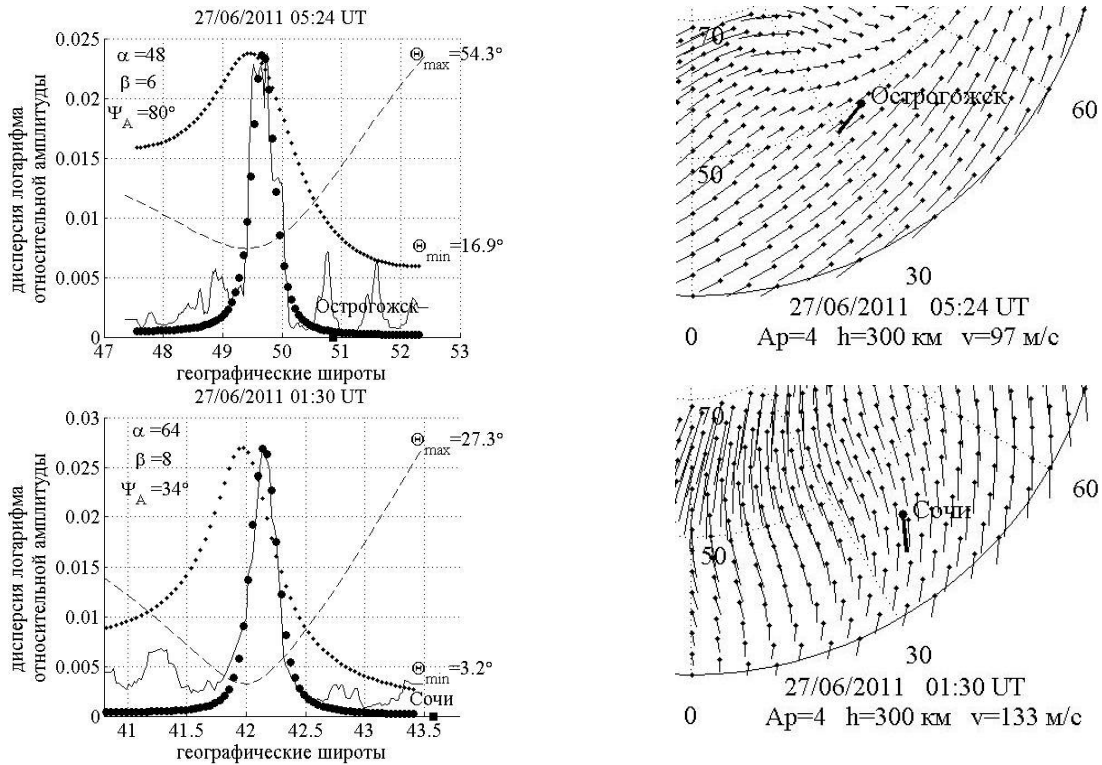
### Наблюдения

В период с июля 2008 г. по март 2012 г. ПГИ проводил регулярный прием радиосигналов низкоорбитальных (~1000 км) отечественных навигационных спутников тремя наземными станциями, расположенными в средних широтах, в г. Острогжск (50.87°N, 39.06°E), г. Ростов-на-Дону (47.21°N, 39.70°E) и г. Сочи (43.58°N, 39.77°E). Эти станции входят в состав радиотомографической установки ПГИ КНЦ РАН. Несмотря на длительное наблюдение, итоговое количество данных, пригодных для сопоставления с моделью HWM07, невелико – 161, что составляет ~3% от общего числа спутниковых сеансов. В основном, это связано с освещенностью: амплитудные сцинтилляции в спутниковом сигнале (показатель присутствия неоднородностей в ионосфере) наблюдались преимущественно в ночное время суток. Затем, интенсивность сцинтилляций не всегда была достаточной для применения метода Терещенко и др. [1] для определения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ . Далее покажем, что в различных ситуациях наблюдается согласие между ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$  и направлением горизонтального ветра  $\Psi_w$ .

На рис. 1 (столбец слева) приведены два независимых примера наблюдения изолированного максимума в широтном профиле графика дисперсии логарифма относительной амплитуды спутникового сигнала. Максимумы получены 27 июня 2011 г. разными станциями с интервалом в 4 часа. Наличие изолированного максимума, в несколько раз превышающего уровень фона, позволяет определить параметры мелкомасштабных неоднородностей путем аппроксимации его теоретической кривой-моделью подбором величин  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ . Эти величины считаются постоянными в области, занимаемой максимумом. Ширина теоретического максимума зависит от вытянутости неоднородностей вдоль  $\alpha$  и перпендикулярно  $\beta$  магнитному полю. Пространственное положение теоретического максимума зависит от азимутальной ориентации поперечной вытянутости  $\beta$  в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Эта величина называется «ориентация поперечной анизотропии»  $\Psi_A$ , измеряется в градусах и отсчитывается по часовой стрелке от направления на географический север.

Аппроксимация максимумов моделью изотропных неоднородностей не обнаруживает согласия между обеими кривыми при любых других параметрах модели неоднородностей. Следовательно, неоднородности в

обоих примерах являются поперечно-анизотропными. Видно, что неоднородности сильнее вытянуты вдоль магнитного поля, чем поперек:  $\alpha > \beta$ , что наблюдалось у неоднородностей высокоширотной ионосферы.

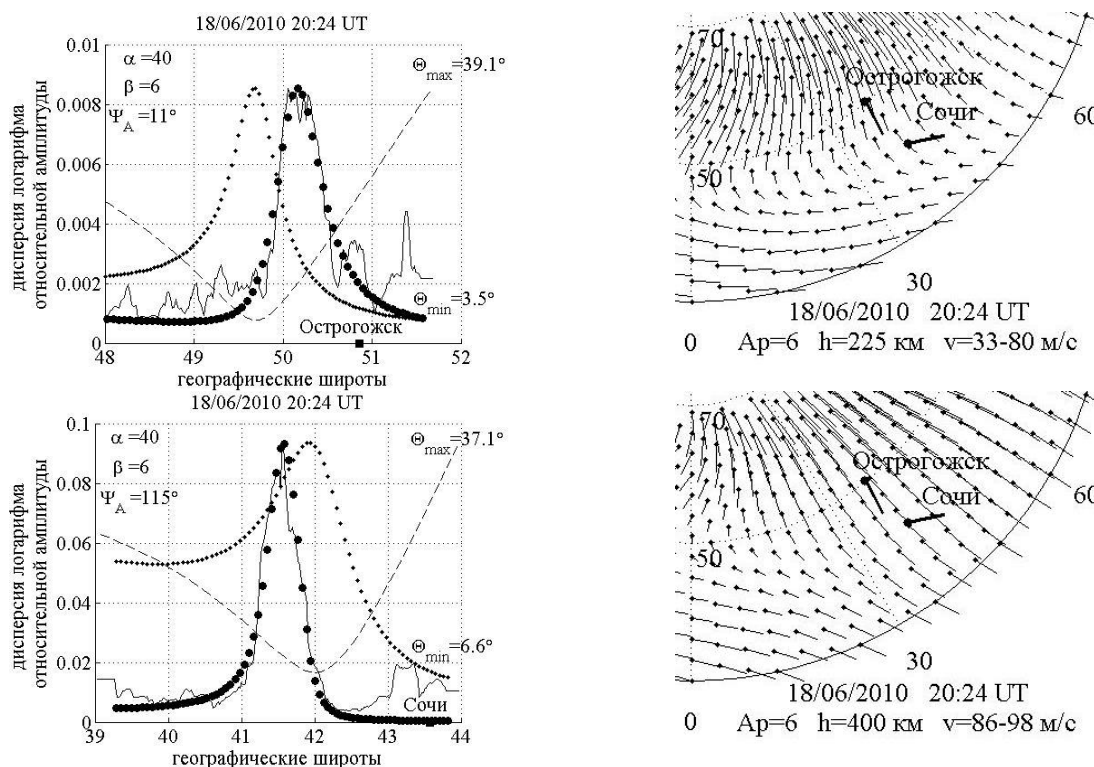


**Рисунок 1.** Левый столбец – изолированный максимум в графике дисперсии, в несколько раз превышающий уровень фона (тонкая линия), и аппроксимация его теоретическими кривыми в предположении изотропных неоднородностей ( $\beta=1$ , точки) и анизотропных ( $\beta>1$ , кружки). В левом верхнем углу – параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$  для оптимальной аппроксимации. Пунктиром показан график значений углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения с указанием минимального ( $\Theta_{min}$ ) и максимального ( $\Theta_{max}$ ) значений. Правый столбец – распределение векторов горизонтального ветра модели HWM07 для  $h=300$  км с указанием скорости для координат при вершине максимума (тонкие векторы с точкой в начале вектора) и ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  неоднородностей (толстый вектор) в области их регистрации. Система координат – географическая.

На рис. 1 (столбец справа) показано распределение векторов горизонтального ветра модели HWM07 для высоты 300 км, предполагаемого максимума F-слоя. Для других высот F-слоя (200÷400 км) картина распределения векторов ветра в окрестности области с неоднородностями была идентичной. (Важно заметить, поскольку  $\beta$  – ось, то при необходимости к текущему значению  $\Psi_A$  можно прибавить  $180^\circ$ ). Сопоставление с моделью HWM07 показывает согласие между направлением ветра  $\Psi_W$  и ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$  в обоих случаях. Пример на рис.1 показывает, что направление ветра меняется от азимутального к меридиональному в различных по времени участках модели HWM07 при постоянстве геофизических условий ( $Ap=4$ ). Корреляция величин  $\Psi_A$  и  $\Psi_W$  позволяет сделать вывод об анизотропии среднеширотных неоднородностей под воздействием горизонтального ветра.

В ночные часы при различных  $Ap$  мелкомасштабные неоднородности наблюдались в области поворота горизонтального ветра модели HWM07 на высотах  $h<300$  км, а на высотах  $h>300$  км направление ветра сохранялось меридиональным (рис. 2). Аппроксимация максимумов показала, что неоднородности поперечно-анизотропны. Различие между величинами  $\Psi_A$  соседних станций велико. Сопоставление с моделью HWM07 показало, что наилучшее согласие обеих величин  $\Psi_A$  с направлением ветра наблюдается на высоте  $h=225$  км, где различие  $\Psi_A - \Psi_W$  для обеих станций было минимальным:  $\Delta\Psi_1 = -13^\circ$  (Острогжск) и  $\Delta\Psi_2 = -47^\circ$  (Сочи).

Сопоставление с моделью HWM07 показало согласие между направлением ветра  $\Psi_W$  и ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$  только для станции Острогжск: на при направлении ветра от  $\Psi_W = 211^\circ$  ( $h = 200$  км) до  $\Psi_W = 175^\circ$  ( $h = 400$  км) различие  $\Psi_A - \Psi_W$  находилось в интервале  $[-20^\circ \div 16^\circ]$ . Для станции Сочи это различие больше: при направлении ветра от  $\Psi_W = 162^\circ$  ( $h = 200$  км) до  $\Psi_W = 173^\circ$  ( $h = 400$  км) различие  $\Psi_A - \Psi_W$  составляло интервал  $[-47^\circ \div -58^\circ]$ .

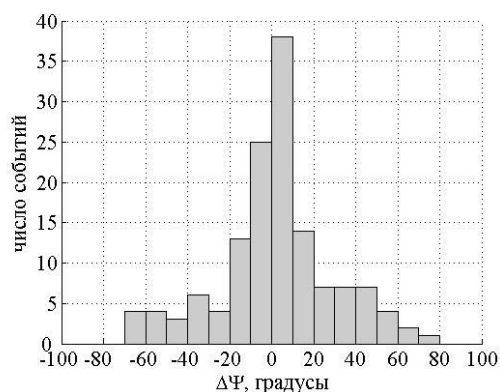


**Рисунок 2.** Пример наблюдения мелкомасштабных неоднородностей 18 июня 2010 г. в 20:24 UT двумя станциями. Условные обозначения те же, что на рис. 1.

Несмотря на большое различие между  $\Psi_A$  и  $\Psi_W$  для станции Сочи, экспериментальные данные не противоречат модели НWM07, поскольку, как и модель, свидетельствуют о существовании участка поворота горизонтального ветра. В эксперименте он обнаружен выше по широте на несколько градусов, чем предсказывает модель. Аналогичные случаи встречались и в другие дни. Показательно, что величины  $\Psi_A$  часто были схожи. Такие случаи внесли наибольший вклад в статистику больших значений  $\Delta\Psi$ , которая графически показана на рис. 3.

На рис. 3 приведен результат численного сопоставления экспериментальных и теоретических данных за весь период наблюдений.

Гистограмма показывает численное различие  $\Delta\Psi$  между ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$  и направлением горизонтального ветра  $\Psi_W$  в каждом конкретном случае. Данные сгруппированы по интервалам с шагом  $20^\circ$ . Положительные значения гистограммы показывают, что величина  $\Psi_A$  была больше величины  $\Psi_W$ . Отрицательные значения показывают обратное. Очевидно, что максимум различий находится в интервале  $[-20^\circ \div 20^\circ]$  и количество случаев уменьшается с ростом  $\Delta\Psi$ . Наблюдаемое согласие между экспериментальными и теоретическими данными позволяет предположить, что поперечная анизотропия среднеширотных неоднородностей возникает под воздействием горизонтального нейтрального ветра.



**Рисунок 3.** Гистограмма различий между ориентацией поперечной анизотропии и направлением горизонтального ветра в период с июля 2008 г по март 2012 г.

## Выводы

Исследованы (в основном, в ночных условиях) естественные мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F-области среднеширотной ионосферы. Показано, что неоднородности поперечно-анизотропны. Определены параметры анизотропии:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ . Численно они варьируют в следующих интервалах:  $\alpha = 15 \div 165$ ;  $\beta = 2 \div 40$ ;  $\Psi_A = 1^\circ \div 178^\circ$ . Величины осей неоднородностей определяются выражением  $1 < \beta < \alpha$  и соотношение  $\beta:\alpha$  варьирует от 1:2 до 1:20, в большинстве случаев составляя 1:7. Эти параметры схожи с соответствующими параметрами высокоширотных неоднородностей.

По результатам численного сопоставления ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  и направления горизонтального ветра, рассчитанного моделью HWM07 для каждого случая, наблюдалось хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими данными, то есть неоднородности ориентированы вдоль направления горизонтального ветра.

**Благодарность.** Автор благодарит сотрудников лаборатории радиопросвечивания Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-05-01024 А и № 15-05-02437 А.

### **Список литературы**

1. Livingston R.C., Rino C.L., Owen J., Tsunoda R.T. The anisotropy of high-latitude nighttime F region irregularities // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. №A12. P. 10519 – 10526.
2. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Nygren T. Anisotropy of ionospheric irregularities determined from the amplitude of satellite signals at a single receiver // *Ann. Geophysicae.* 1999. V. 17. P. 508 - 518.
3. Романова Н.Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // *Proc. XXXVIII Apatity Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”.* 2015. P. 157-160.
4. Козлова М.О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов: Дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29. — М., 2002. — 120 с.
5. Ишанов С.А., Клевцур С.В., Латышев К.С. Эффекты многомерности в теоретических моделях среднеширотной области F ионосферы // *Вестник Балтийского федерального университета им. И.Канта.* 2011. №10. С. 33-39.
6. Drob D.P. et al. An Empirical Model of the Earth's Horizontal Wind Fields: HWM07 // *J. Geophys Res.* 2008. V.113. doi:10.1029/2008JA013668.
7. Emmert J.T. et al. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds // *J. Geophys Res.* 2008. V.113. doi:10.1029/2008JA013541.